

登陆台风维持和暴雨增幅实例的能量学分析*

励申申 寿绍文**

(南京气象学院气象学系, 南京 210044)

摘要 对登陆后迅速消亡的 8116 号台风和登陆后长期维持不消的 8407 号台风的动能平衡作对比分析, 结果表明: 对流层上部动能水平通量辐散和穿越等压线的运动使 8116 号台风迅速消亡, 其中以正压过程为主; 8407 号台风则从环境大气输入动能和位能, 这可能是台风暖性低压长久不消的重要原因。最后讨论了台风动能水平通量辐散与外围暴雨增幅的关系。

关键词 登陆台风, 动能平衡, 暴雨增幅

分类号 P444

台风是一种强动能源, 在大气环流能量中有重要作用。M. Frank⁽¹⁾指出在台风的外圈对流层上层有大量的动能输出。谢安等⁽²⁾认为可以把台风看成动能的“准封闭系统”⁽²⁾。文献[3, 4]则提出台风向外输出动能是外围暴雨发生的扰动源。不同类型的台风可能有不同的动能平衡机制, 不同的机制将会对台风登陆后维持的时间和降水特征产生影响。

近年来在动能平衡的研究中已广泛注意到旋转风动能制造的重要性, 以及旋转风的非地转部分对台风登陆初期动能减小的作用⁽²⁾。本文将两类登陆台风实例的动能平衡以及旋转风和散度风在其中所起的作用进行对比分析, 试图揭示台风登陆后维持的机制和外围暴雨增幅的能量特征。

1 资料和计算方法

1.1 资料及其处理

8116 号台风于 1981 年 9 月 22 日清晨在广东陆丰县登陆, 登陆时中心气压为 985hPa, 当天下午在远离台风中心的浙江省乐清附近发生日降水量为 475mm 的特大暴雨, 台风维持不到 24h 便迅速消亡。8407 号台风于 1984 年 8 月 8 日凌晨 2 时在福建省罗源附近登陆, 中心气压为 988hPa。登陆后转向北上, 初期雨量不大, 24h 大于 50mm 的雨区集中在台风路径两侧 150km 的狭长地区(图 1)。台风暖性低压维持近 4 天, 途经闽、赣、鄂、豫、鲁、冀、津等省市, 进入辽西后才变为温带气旋, 由俄罗斯入海。

计算动能平衡的时间分别为 1981 年 9 月 22 日 08~20 时和 1984 年 8 月 8 日 08~20 时。近海地区, 用天气图读取资料建立“人造站”来弥补海上站点的稀疏。水平方向 $d = 100\text{km}$ 用

* 国家“八五”攻关项目 85—906—07 资助项目

** 本院 1993 届毕业生张东雷参加部分工作

收稿日期: 1994—04—29; 改回日期: 1995—03—20

高斯插值法求得网格点上的值;垂直方向 $\Delta p = 100\text{hPa}$ 从 $1000 \sim 100\text{hPa}$, 用拉格朗日方法插成 10 层。

散度场和垂直运动由实测风计算并用 O'Brein 方法订正, 下边界 1000hPa 和上边界 100hPa 取 $\omega = 0$ 。根据订正后的散度场取 $\chi|_L = 0$ 解泊松方程

$$\nabla^2 \chi = D \quad (1)$$

求得速度势。按公式

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial s} \right|_L = -v_n + \frac{\partial \chi}{\partial n} \quad (2)$$

取起始点 $\psi = \frac{\varphi}{f}$ 定出 ψ 的边值再解泊松方程

$$\nabla^2 \psi = \zeta \quad (3)$$

求出各等压面的流函数 ψ 值。

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_R + \mathbf{v}_D \quad (4)$$

计算区域如图 1 外框所示, 其中 I 区和 II 区分别为 8116 号和 8407 号台风计算动能平衡的积分区域, 面积均为 $8.1 \times 10^{11} \text{m}^2$ 。

1.2 基本公式

动能平衡方程为

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{1}{\sigma g} \iint \left[-\nabla \cdot k\mathbf{v} - \frac{\partial \omega k}{\partial p} - \mathbf{v} \cdot \nabla \varphi \right] d\sigma dp + R \quad (5)$$

$K = \frac{1}{\sigma g} \iint k d\sigma dp$, $k = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ 是单位质量

大气的水平运动动能, K 为区域平均垂直积分总动能, φ 为重力位势, 其它均为常用符号。(5) 式可简写为

$$\frac{\partial K}{\partial t} = HFK + VFK + GR + R \quad (6)$$

(6) 式各项分别表示区域内单位面积的动能变化率, 动能水平通量散度和垂直通量散度以及动能产生项。 R 为余项, 包括摩擦消耗、网格尺度与次网格尺度间动能转换和计算误差等。

2 结果分析

2.1 台风区动能平衡

动能平衡的结果列于表 1, 台风登陆后动能都有明显减小, 但 8116 号台风的衰减速度比 8407 号台风快一倍以上。8116 号台风的动能水平通量辐散向环境大气输出动能, 摩擦辐合使 $1000 \sim 700\text{hPa}$ 的动能产生率为正值但整层积分为负值。表明这类台风登陆后扰动动能的维持不是由于气流穿越等高线做功也没有来自有效位能的转换, 台风处于使它本身衰减的环境场中。8407 号台风动能水平通量辐合, 动能制造项 GK 各层均为正值, 气压场做功是扰动维持的内部动能源。

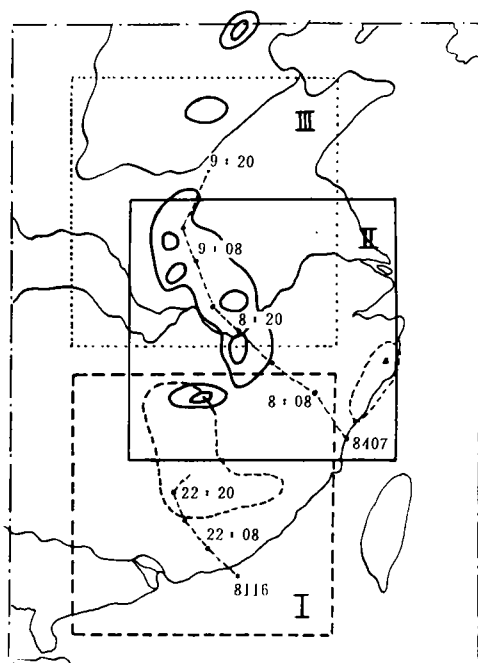


图 1 8116 号 and 8407 号台风路径和降水量图
虚线和实线分别为 1981 年 9 月 22 日 08 时~23 日 08 时
和 1984 年 8 月 8 日 08 时~9 日 08 时 50mm 雨量线
Fig. 1 Tracks of Typhoons 8116 and 8407 and rainfall
distribution. Solid lines are 50 mm isopleths for
0800 BST, 8 to 0800, August 9, 1984 and the dashed
for 0800, 22 to 0800 h, September 23, 1981

表 1 台风区动能平衡(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Table 1 Kinetic energy balance of the Typhoon areas

p/hPa	8116 号					8407 号				
	(1981-09-22 08~20 时)					(1984-08-08 08~20 时)				
	$\frac{dk}{dt}$	HFK	VFK	GK	R	$\frac{dk}{dt}$	HFK	VFK	GK	R
400~100	-0.80	-1.55	0.49	-7.32	7.57	-0.37	-0.46	0.31	2.54	-2.76
700~400	-0.92	-0.80	0.17	-3.45	3.16	-0.97	1.04	0.00	0.70	-2.71
1000~700	-1.60	0.30	-0.66	7.84	-9.08	-0.22	0.78	-0.31	6.26	-6.95
1000~100	-3.32	-2.05	0.00	-2.93	1.65	-1.56	1.36	0.00	9.50	-12.42

表中 R 是作为方程各项的余差处理,低层的负值代表摩擦消耗,在对流层上层两个例子的符号是相反的,8116 号台风的次网格效应成为动能源,8407 号台风有网格尺度的动能转换为次网格尺度运动。表明在登陆台风中,由于其内部结构和动力学特征的差异,有的台风(如 8116)积云对流维持了天气尺度的扰动,而另一类台风(8407)则消耗天气尺度动能支持积云对流。

如前所述,台风登陆时强度相近,由于动能平衡机制不同,8116 号台风是外部环境的动能源使台风迅速消亡。8407 号台风由于动能水平通量辐合和动能制造项提供能源从而大大减缓了台风的衰减速度。

2.2 动能产生率和动能水平通量散度的进一步分析

应用(4)式动能产生率 GK 可写为

$$-\mathbf{v} \cdot \nabla \varphi = -\mathbf{v}_R \cdot \nabla \varphi - \mathbf{v}_D \cdot \nabla \varphi \tag{7}$$

或 $GK = GR + GD$

GR 和 GD 分别为旋转风和散度风动能产生率。Pearce^[6]把这两种动能产生过程简单地称为“正压过程”和“斜压过程”。其中正压过程的动能产生率

$$GR = -\mathbf{v}_R \cdot \nabla \varphi = -\nabla \cdot \mathbf{v}_R \varphi \tag{8}$$

即是旋转风位能通量散度,当 $GR < 0$ 时有旋转风位能通量辐散,对有限区域而言可以看成是区域外部的动能源或汇。只有 GD 才是真正区域内部的源或汇。图2给出它们的垂直分布,8116 号台风的 GD 在 600hPa 以下和 300hPa 以上为正值,对流层中层是负值,整层积分为 $+4.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。8407 号台风也有类似的分布,垂直总量 $2.38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这个量级比梅雨期次天气尺度的散度风动能产生率 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[6]要小,说明登陆台风的斜压性比中纬度系统弱。两个例子的主要差别是 GR ,8116 号台风在 600hPa 以下为正值其余为负,整层积分为 $-7.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而 8407 号台风各层都是正值。8116 号台风虽然是斜压不稳定但却有很强正压稳定性,8407 号台风的旋转风非地转部分是扰动维持的能源。

用(4)式把动能水平通量散度写为

$$-\nabla \cdot \mathbf{v} k = -\nabla \cdot \mathbf{v}_R k - \nabla \cdot \mathbf{v}_D k \tag{9}$$

或 $HFK = HFR + HFD$

右边两项为旋转风和散度风动能水平通量散度,图 3 给出它们的垂直分布。图 3a、b 的 HFD 垂直分布基本相似, HFR 却有很大差异。8407 号台风有深厚的辐合层,动能水平输送 $(-\nabla \cdot \mathbf{v}_R k = -\mathbf{v}_R \cdot \nabla k)$ 的极大值是在 900~800hPa 和 600~500hPa,这与台风东北侧 800hPa 和 500hPa 两个强风带有关(图略)。800hPa 的 HFD 和 HFR 大小相当,而 500hPa HFR

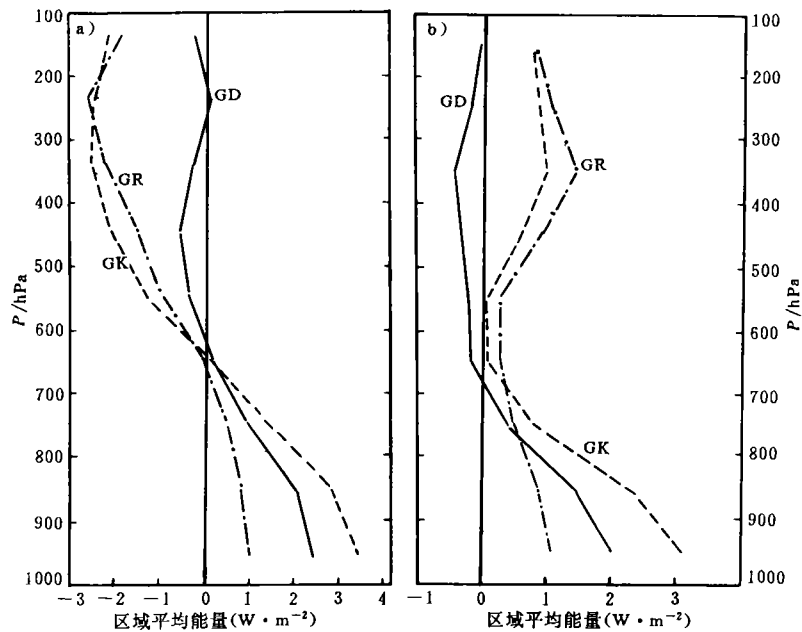


图 2 GR、GD 和 GK 的垂直分布($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) a. 8116 号; b. 8407 号

Fig. 2 Averaged vertical profiles of kinetic energy generations for GR, GD and GK ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

a) Typhoon 8116, b) Typhoon 8407

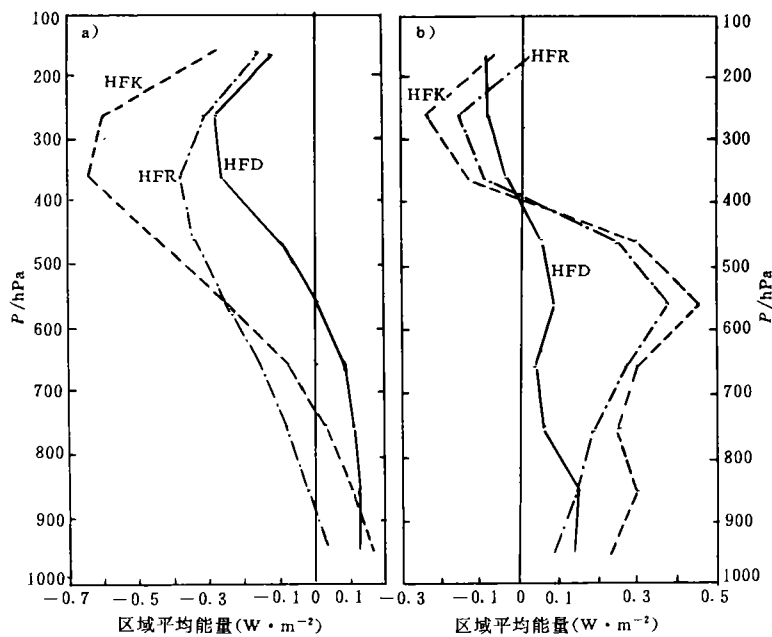


图 3 HFK、HFR 和 HFD 的垂直分布($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) a. 8116 号; b. 8407 号

Fig. 3 Averaged vertical profiles of HFK, HFR and HFD ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). Otherwise as in Fig. 2

占优势,表明这支强风带在 800hPa 具有较大的斜压性,500hPa 具有较大的正压性。8116 号台风的 HFR 以辐散为主,垂直积分总量 $-1.71\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。向外输出动能的极大值出现在 400

~300hPa,这里恰好是台风右侧强风带所在的高度^[3]。

分析对流层上层旋转风和位势高度场(图 4)有助于说明这种差异,图 4a 在台风上空有向高压区运动的反气旋辐散气流,它的形成可能与台风内降水潜热释放和台风南侧副热带高压的增强有关。释放的潜热增加其位能并通过反气旋辐散气流向外输送,次天气尺度的强迫机制迭加在环境气压场上形成了指向高压的动能消耗。8407 号台风(图 4b)则不然,台风的北面 and 东面是强大的副热带高压,台风登陆北上使东北侧的偏东风气流以气旋式旋转向台风内辐合,

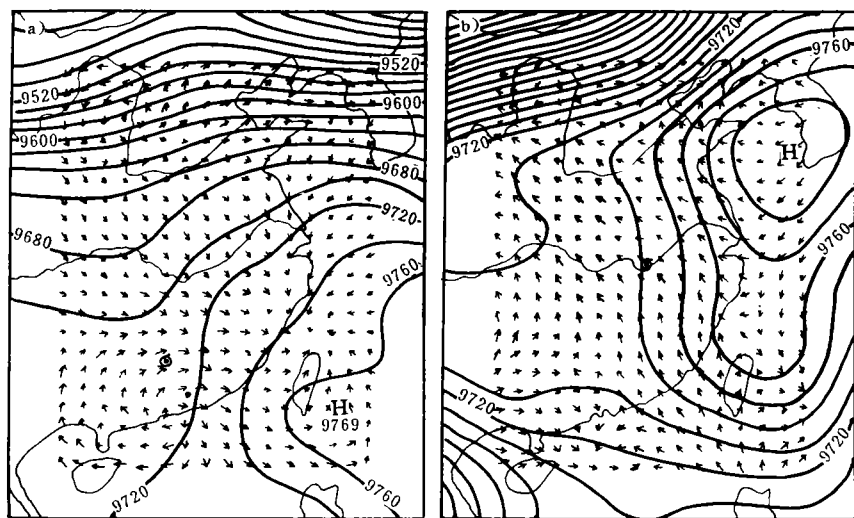


图 4 300hPa 旋转风和位势高度场 a. 1981 年 9 月 22 日 20 时; b. 1984 年 8 月 8 日 20 时

Fig. 4 300 hPa rotational wind and height fields for 2000 h of September 22, 1981 (a) and August 8, 1984 (b)

气压场做功有利于台风暖性低压的维持。由此可见,台风与环境之间的能量联系是由台风内部的风场结构和环境的气压场形势决定的,不同的能量过程与台风登陆后维持时间的长短可能有密切的关系。

3 动能水平通量散度与暴雨增幅的关系

实例分析表明台风区向外输出动能是外围暴雨发生的重要物理过程^[4]。8116 号台风与其外围暴雨的相互关系已在文献[3]作过详细讨论,以下将讨论 8407 号台风。

8407 号台风登陆初期降水集中在台风路径两侧,如庐山和九江等地 1h 最大雨量恰好出现在台风中心到达前后。因此台风低压能否维持北上华北地区预报有无台风降水的首要问题。随着台风北上,偏东风急流轴逐渐转向,8 日 08 时~20 时急流轴顺时针旋转并向北伸展(图略),风向由偏东风转为偏南风。由于急流轴和风向的转变,随台风移动的区域平均垂直积分动能水平通量散度(HFR)由辐合变成辐散(图略)。8 日 20 时 $HFR < 0$,9 日凌晨台风中心尚在湖北境内时,就在远离台风中心的密云(9 日 01~02 时)和北京(9 日 03~04 时)出现 28mm 和 57mm 的强降水。随着动能水平通量辐散的逐渐加大,台风与西风带系统相结合激发出河北省和京、津地区一次大暴雨过程。

以上事实表明,台风区动能水平通量辐散与外围暴雨增幅存在一定的联系,这种联系可能

是台风与其外围暴雨(8116 号台风)或者是台风与西风带系统(8407 号台风)相互作用的一种机制。而动能水平通量散度又与台风外半径的强风带或急流轴的特征有关。因此台风外半径的强风带不仅是台风低压维持的重要系统也是激发外围暴雨增幅的重要系统。

4 小 结

(1)登陆台风衰减速度的快慢与环境大气的动能和位能输送有关。8116 号台风向环境输出动能和位能因而登陆后迅速消亡。8407 号台风有旋转风动能和位能水平通量辐合,环境大气提供能源可能是台风暖性低压维持不消的重要原因。

(2)台风区外半径的风场结构和环境气压场形势在动能平衡中起重要作用。8116 号台风对流层中、上层的强风带反气旋式旋转向外辐散动能和位能使台风迅速衰减。8407 号台风的东南风急流气旋式旋转向内辐合,因此它是为台风扰动的维持提供动能源的重要系统。

(3)台风区动能水平通量辐散与外围暴雨增幅存在一定的联系,这是台风与外围暴雨或台风与西风带系统相互作用的重要物理过程,台风区动能输出是外围暴雨发生发展的一类扰源。

参 考 文 献

- 1 Frank M. The structure and energetics of the Tropical cyclone, I: Dynamics and Energetics. *Mon Wea Rev*, 1977, 105 (9): 1136~1150
- 2 谢 安,肖文俊,陈受钧. 登陆台风的能量学分析. *气象学报*, 1982, 40(3): 289~299
- 3 励申申,寿绍文,王 信. 登陆台风与其外围暴雨的相互作用. *气象学报*, 1992, 50(1): 33~40
- 4 胡 坚. 华东地区台风暴雨的诊断研究. *大气科学*, 1991, 15(3): 111~117
- 5 Pearce R P. The design and interpretation of diagnostic studies of synoptic-scale atmospheric systems. *Quart J Royal Met Soc*, 1974, 100: 265~285
- 6 谢 安,肖文俊,陈受钧. 梅雨期间次天气尺度扰动的动能平衡. *气象学报*, 1980, 38(4): 351~366

ENERGETIC ANALYSIS OF MAINTENANCE AND RAINFALL AMPLIFICATION OF LANDED TYPHOONS

Li Shenshen Shou Shaowen

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract Kinetic energy balance and distribution were computed and compared for landed typhoons 8116 and 8407, the former decaying quickly and the latter maintained for long before disintegration. Results show that the short-lived storm was related to the horizontal flux divergence of upper troposphere kinetic energy and cross-isobaric motion, and the long-lived one had input of kinetic/potential energy from the ambient atmosphere, presumably an important cause of the persistent maintenance of the typhoon's warm depression. In the end, relation was investigated between the horizontal flux divergence and typhoon heavy rain enhancement.

Keywords typhoon maintenance, kinetic energy balance, rainstorm amplification